

Оценка технико-экономической эффективности применения аддитивных технологий при изготовлении деталей космических аппаратов

© Ю.П. Борщев, В.К. Сысоев

АО «НПО Лавочкина», г. Химки, 141402, Московская область, Россия

На конкретных примерах угловых волноводов и антенн, изготовленных в «НПО Лавочкина», приведен технико-экономический анализ эффективности использования особенностей и преимуществ аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) при проектировании и изготовлении элементов антенно-фидерных систем (АФС) космических аппаратов. Показаны основные преимущества применения технологии СЛС в сравнении с использованием традиционных технологий, а именно: сокращение длительности и стоимости процессов разработки и изготовления изделий; возможность создавать уникальные, недоступные для других технологий конструкции с новыми эксплуатационными характеристиками; улучшение массогабаритных характеристик; увеличение срока активного существования космических аппаратов за счет повышения надежности АФС. Результаты технико-экономического анализа подтверждают эффективность и актуальность внедрения технологии СЛС в условиях мелкосерийного производства элементов АФС космических аппаратов на предприятиях ракетно-космической отрасли.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, космический аппарат, антенно-фидерная система, технико-экономическое обоснование

Введение. Для разработки продукции космического приборостроения требуются значительные затраты, так как при отработке новых конструкций приходится изготавливать несколько вариантов изделий, чтобы с учетом возможностей имеющихся технологий приблизиться к оптимальному варианту. Недавно появившиеся аддитивные технологии и программные продукты позволяют в несколько раз сократить время и затраты на проектирование и изготовление сложнопрофильных изделий космического назначения, включая и элементы радиоэлектронной аппаратуры. Значительные работы в этой области проводятся в АО «РКС», АО «ОСТЕК-СМТ» и АО «НПО Лавочкина» [1, 2].

Благодаря применению технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) при изготовлении изделий для космического приборостроения можно с высокой эффективностью решать сразу несколько задач:

- ускорение процесса проектирования и конструирования изделий;
- существенное уменьшение массы проектируемых элементов антенно-фидерных систем (АФС), что немаловажно для их применения в космическом приборостроении;

– сокращение сроков и стоимости изготовления деталей АФС, особенно в условиях мелкосерийного производства, характерного для предприятий ракетно-космической отрасли.

Для того чтобы наглядно представить данный подход к проектированию и изготовлению деталей АФС космического назначения, он далее будет показан на конкретных примерах. В качестве примеров для расчета технико-экономической эффективности изготовления изделий с помощью технологии СЛС выбраны такие наиболее часто используемые в АФС элементы, как угловые волноводы, рупорные и спиральные антенны, прошедшие испытания и показавшие удовлетворительные радиотехнические характеристики (РТХ).

Цель настоящей работы — сравнение путем технико-экономического анализа затрат на изготовление угловых волноводов и антенн космического аппарата (КА) по традиционной технологии и с применением метода СЛС [3, 4].

В настоящее время элементы АФС изготавливают, как правило, из нескольких сборочных единиц, соединяемых крепежными элементами или пайкой [5]. Рассматриваемые изделия, перепроектированные под возможности применения технологии СЛС, изготовлены цельными из отечественного паспортизированного материала, синтезированного из порошка АСП-40 AlSi10Mg (ТУ 24.42.21-862-56897835–2019), на 3D-принтере SLM 280 HL с платформой построения размерами 280×280 мм и максимальной высотой построения 350 мм [6].

Топологическая оптимизация, решаемые задачи. Топологическая оптимизация конструкции в аддитивном производстве — это математический метод, с помощью которого решается задача оптимального распределения материала конструкции без ухудшения ее функциональных свойств в пространстве, подверженном воздействию внешних факторов. Другими словами, топологическая оптимизация — это уменьшение массы и формы конструкции при ее неизменной функциональности [7, 8]. Для топологической оптимизации конструкции изделий используются специальные программы, позволяющие моделировать процесс аддитивного производства (деформации, перегрев) и воздействие эксплуатационных факторов.

В случае проектирования элементов АФС геометрия токопроводящей части их конструкции, определяющаяся электродинамическим моделированием, должна быть максимально приближена к расчетной, т. е. уже частично оптимизирована. Уменьшить массу элементов можно изменением толщины стенок и перепроектированием сборочных изделий в цельные посредством устранения соединительных элементов. Именно такой подход и был использован при изготовлении конкретных изделий.

Технико-экономическое обоснование на внедрение новых технологий в большинстве публикаций [1–3, 7, 8] заключается в сравнении

технологической себестоимости изготовления изделий по существующей и по внедряемой технологиям, что правомерно в тех случаях, когда не изменяются конструкция и эксплуатационные характеристики изделий, а также требования техники безопасности в процессе производства. В ракетно-космической отрасли при анализе целесообразности внедрения новой технологии наряду с оценкой себестоимости технологического процесса изготовления изделий необходимо учитывать следующие существенные факторы:

- уменьшение массы изделия с учетом того, что на сегодняшний день стоимость вывода на околоземную орбиту 1 кг массы может достигать 15 000 евро;
- увеличение срока активного существования изделия за счет повышения его надежности;
- уникальность конструкции изделия, которое можно изготовить только с применением новой технологии;
- экологические аспекты производства;
- изменение циклов проектирования, технологической подготовки и непосредственно процесса производства изделия.

При расчете технологической себестоимости изготовления деталей как по традиционной технологии, так и с применением технологии СЛС берут приведенные в конструкторской документации (КД) данные технологических процессов и действующие в организации экономические нормативы.

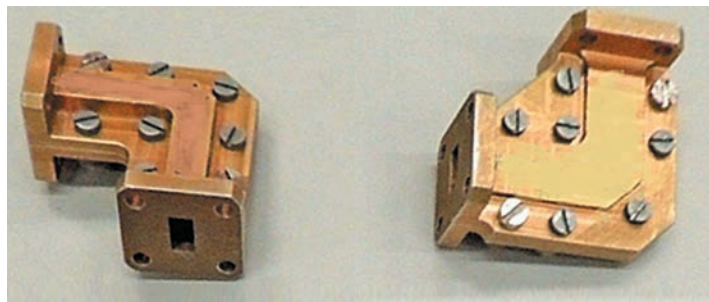
Расчет технологической себестоимости изготовления изделий с применением технологии СЛС на 3D-принтере SLM 280 HL. При расчетах себестоимости изготовления изделий с помощью СЛС учитываются затраты на материал и проведение следующих операций:

- адаптация 3D-модели и подготовка к процессу изготовления;
- обеспечение процесса изготовления;
- очистка оборудования;
- термообработка;
- удаление технологических поддержек;
- постобработка и сборка;
- испытания.

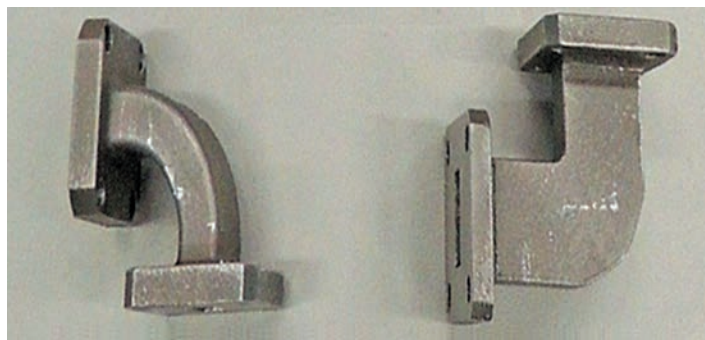
Рассмотрим эффективность применения технологии СЛС при изготовлении конкретных элементов АФС.

Фотографии угловых волноводов и рупорных антенн, изготовленных по традиционным технологическим процессам и с применением технологии СЛС, показаны на рис. 1 и 2 соответственно. Полученные механическим способом угловые волноводы состоят из двух частей и собраны крепежными изделиями винт–гайка, а рупорные антенны — из нескольких деталей. Очевидно, что имеющиеся в конструкции элементов АФС стыки в токопроводящих каналах существенно снижают РТХ этих изделий. Кроме того, для рупорных антенн

невозможно изготовить расчетную геометрию поляризатора механической обработкой, поэтому требуется добавить в конструкцию настроечные элементы для проведения юстировки РТХ на специальном стенде.



a



б

Рис. 1. Угловые волноводы, изготовленные механической обработкой (*a*) и с применением технологии СЛС (*б*)



a

б

Рис. 2. Рупорные антенны, изготовленные механической обработкой (*a*) и с применением технологии СЛС (*б*)

Процесс изготовления конической спиральной антенны может служить еще одним примером целесообразного применения технологии СЛС. Традиционный технологический процесс ее получения из пяти сборочных единиц (рис. 3) включает следующие операции: изготовление деталей; сборка, пайка; настройка.

Однако использование технологии СЛС вместо традиционных позволит уменьшить число деталей в конструкции и число мест пайки с 10 до 2, а также исключить операцию настройки параметров. Спиральные антенны, изготовленные по обеим технологиям [10], показаны на рис. 4.

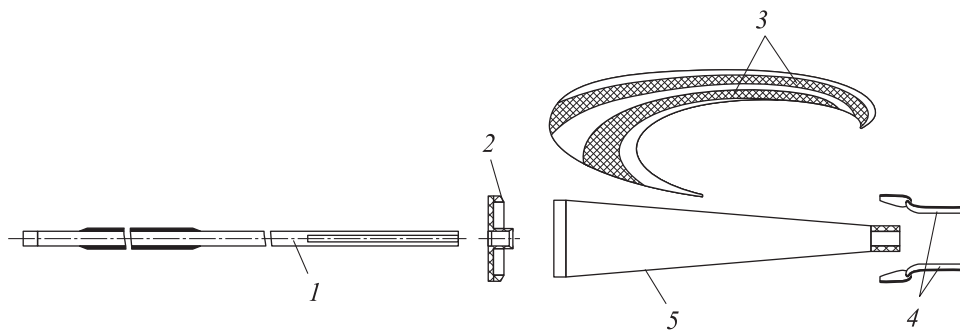
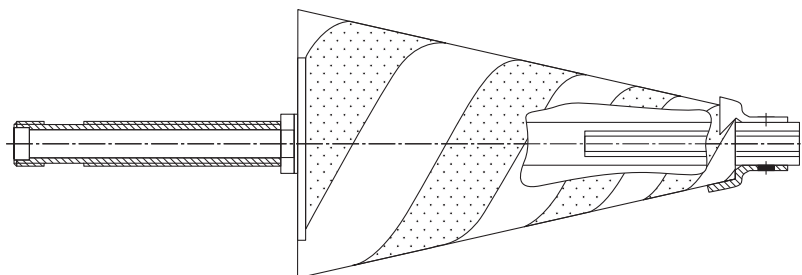


Рис. 3. Сборочные единицы корпуса спиральной антенны при традиционной технологии изготовления:

1 — корпус коаксиальной линии; 2 — основание (диэлектрик); 3 — две латунные спирали; 4 — контакты; 5 — корпус антенны (диэлектрик)



a



б

Рис. 4. Корпус спиральной антенны, собранный по традиционной технологии (*a*) и изготовленный с применением технологии СЛС (*б*)

Для сравнения в таблице представлены параметры двух вариантов изготовления (традиционного и с применением технологии СЛС) углового волновода, рупорной антенны и корпуса конической спиральной антенны. Количество изделий для технологии СЛС принято из расчета полного заполнения платформы построения. Этот подход более реалистичен, чем изготовление одной детали, так как при небольших количествах и размерах деталей платформа построения обычно полностью заполняется разными по конструкции деталями. Количество и трудоемкость изготовления изделий по традиционным технологиям указаны при производстве одного изделия и количества изделий в партии, равного при изготовлении с применением СЛС.

Параметры процессов изготовления конкретных элементов АФС

Параметр	Традиционная технология			Технология СЛС		
	Угловой волновод	Рупорная антенна	Корпус конической антенны	Угловой волновод	Рупорная антенна	Корпус конической антенны
Количество деталей в конструкции, шт.	2 + крепеж	3+ крепеж и настроечные винты	9	1	1	1
Число операций техпроцесса	10	18	15	5	5	6
Количество изготавливаемых изделий, шт.	1/15	1/9	1/16	15	9	16
Трудоемкость изготовления единицы изделия, нормо-час	36,0/12,0	132,0/42,0	180,0/62,0	5,6	13,0	21,0
Производственный цикл, дни	5	8	15	3	4	8
Масса изделия, кг	0,079	0,349	0,065	0,048	0,212	0,049

Анализ значений параметров на единицу изделия, приведенных в таблице, наглядно показывает преимущества технологии СЛС при одинаковом количестве изготавливаемых изделий:

- трудоемкость снижается в 2–3 раза;
- цикл производства сокращается в 1,5–2 раза;
- масса изделия снижается на 25...40 %.

При единичном производстве изделий по традиционной технологии трудоемкость и цикл производства кратно возрастают по

отношению к СЛС. Кроме того, преимущество СЛС подтверждают следующие показатели:

- уменьшение массы изделия, выводимого на орбиту, что снижает стоимость запуска КА или дает возможность увеличить массу полезной нагрузки;

- увеличение температурного диапазона эксплуатации (200 °С вместо 150 °С) при отказе от клеевого соединения;

- отказ от работ с вредными условиями труда — в случае спиральной антенны;

- сокращение циклов проектирования за счет изготовления цельных изделий вместо сборочных;

- удешевление логистических процессов в производственном процессе;

- улучшение основных РТХ элементов АФС благодаря приближению геометрии расчетных моделей к изготовленным деталям.

Следует, однако, отметить, что наряду с преимуществами немаловажной особенностью технологии СЛС является такой недостаток, как шероховатость поверхностей синтезированных изделий, что может оказаться критичным для РТХ некоторых элементов АФС. Шероховатость поверхностей элементов АФС, в том числе электропроводящих, полученных с применением технологии СЛС, существенно выше шероховатости, требующейся по конструкторской документации. Авторами была проведена работа по исследованию влияния шероховатости поверхностей каналов волноводов на их радиотехнические характеристики. Результаты исследований показали, что изготовленные с применением технологии СЛС волноводы сантиметрового диапазона частотой от 4,3 до 28 ГГц с каналами размерами от 8,6×4,3 до 35×15 мм из отечественного порошка алюминиевого сплава AlSi10Mg имеют РТХ, удовлетворяющие техническим требованиям конструкторской документации. Это дает все основания рекомендовать применение технологии СЛС при изготовлении волноводов АФС КА сантиметрового диапазона без дополнительной обработки поверхностей каналов [2, 11], тем более что отсутствуют недорогие технологии снижения шероховатости внутренних каналов элементов волноводных трактов [12].

Заключение. Широкие возможности технологии селективного лазерного сплавления в совокупности с современным программным обеспечением снимают ограничения по созданию оптимизированных конструкций элементов АФС, обладающих новыми эксплуатационными характеристиками, недоступных для изготовления с использованием существующих технологий.

В результате проведения технико-экономической оценки и анализа условий сложившегося мелкосерийного производства элементов АФС для КА были получены данные, подтвердившие актуальность

внедрения технологии СЛС, которая позволяет значительно, а в некоторых случаях даже кратно, снизить себестоимость и сократить производственный цикл. Но все же следует заметить, что для каждого конкретного изделия, планируемого к изготовлению с помощью технологии СЛС, необходимо проводить технико-экономический анализ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тюлин А.Е., Ерохин Г.А., Павлов А.В., Горбунов В.А., Тюлькова А.А., Смирнова О.Н. Применение 3D-печати для изготовления элементов радиоэлектронной аппаратуры космического назначения. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2022, т. 9, № 3, с. 76–90.
- [2] Ермаков А., Калинин В., Нисан А., Потапов Г., Фролова Е. Опыт 3D-печати элементов волноводных СВЧ-трактов и рупорных антенн диапазона 8,5–31 ГГц. *Вектор высоких технологий*, 2019, № 1 (41), с. 8–19.
- [3] Борщев Ю.П., Сысоев В.К. Интегрированная методика проектирования элементов антенно-фидерных систем космических аппаратов и технологических процессов их изготовления с применением селективного лазерного сплавления. *Вестник Московского авиационного института*, 2022, т. 29, № 2, с. 35–44.
- [4] Борщев Ю.П., Ананьев А.И., Камышанов И.В., Телелеев Е.Н. Применение метода 3D-печати при изготовлении элементов антенно-фидерных устройств космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 9 (105). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-9-2014>
- [5] Бушминский И.П. *Изготовление элементов конструкции СВЧ. Волноводы и волноводные устройства*. Москва, Высшая школа, 1974, 304 с.
- [6] SLM280 2.0.
URL: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-280/> (дата обращения 18.05.2023).
- [7] Кяримов Р.Р., Шапошников Н.Н., Митрянин А.В. Технико-экономическое обоснование применения аддитивной технологии селективного лазерного сплавления на примере элементов космической техники из титана. *Космическая техника и технологии*, 2022, № 4 (39), с. 4–20.
- [8] Князев С.А., Пыжов С.И. Анализ технико-экономической целесообразности внедрения аддитивных технологий в вертолетостроении. *Молодой ученый*, 2019, № 49, с. 175–184. URL: <https://moluch.ru/archive/287/64950/>
- [9] Борщев Ю.П. и др. *Рупорная антенна с эллиптическим поляризатором. Патент РФ № 2778279*. Заявка: 2021128844 от 04.10.2021 г. Опубликовано: 17.08.2022. Бюл. № 23.
- [10] Борщев Ю.П. и др. *Коническая спиральная антенна и способ ее изготовления. Патент РФ № RU 2 730 114 С2*. Заявка: 2020100068 от 10.01.2020. Опубликовано: 17.08.2020. Бюл. № 23.
- [11] Первый опыт печати металлом волноводного фильтра Ка-диапазона на 3D-принтере. *Блог компании Специальный Технологический Центр*. URL: https://habr.com/ru/companies/stc_spb/articles/659691/ (дата обращения 18.05.2023).
- [12] Смирнов А.С., Галиновский А.Л., Мартысюк Д.А. Снижение шероховатости поверхностей аддитивных изделий электрохимическими методами обработки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 7, с. 16–23. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-7-16-23

Статья поступила в редакцию 09.06.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Борщев Ю.П., Сысоев В.К. Оценка технико-экономической эффективности применения аддитивных технологий при изготовлении деталей космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-10-2310>

Борщев Юрий Петрович — аспирант, начальник участка отдела № 323, АО «НПО Лавочкина». e-mail: VorshchevIUP@laspace.ru

Сысоев Валентин Константинович — д-р техн. наук, начальник отдела научно-исследовательских работ и перспективных исследований АО «НПО Лавочкина». e-mail: Sysoev@laspace.ru

Assessment of the technical and economic efficiency of using additive technologies in manufacture of the spacecraft parts

© Yu.P. Borshchev, V.K. Sysoev

Lavochkin Association, Khimki, 141402, Russia

The paper presents technical and economic analysis of the effectiveness of using the features and advantages of the additive selective laser melting (SLM) technology in design and manufacture of the spacecraft antenna-feeder systems (AFS) elements using specific examples of the angular waveguides and antennas manufactured at the Lavochkin Association. Main advantages of introducing the SLM technology in comparison with the use of traditional technologies are shown. They include reducing duration and cost of the product development and manufacturing processes; ability to create unique designs with new performance characteristics inaccessible to other technologies; improvement of the weight and size characteristics; increasing the spacecraft active life by improving the AFS reliability. Results of the technical and economic analysis confirm effectiveness and relevance of the SLM technology implementation in conditions of the spacecraft AFS elements small-scale manufacture at the rocket and space industry enterprises.

Keywords: selective laser melting, spacecraft, antenna-feeder system, feasibility study

REFERENCES

- [1] Tyulin A.E., Erokhin G.A., Pavlov A. V., Gorbunov V.A., Tyulkova A.A., Smirnova O.N. Primeneniye 3D-pechati dlya izgotovleniya elementov radioelektronnoy apparatury kosmicheskogo naznacheniya [The Use of 3D Printing for the Manufacture of Radio Electronic Equipment Elements for Space Application]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy — Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2022, vol. 9, no. 3. pp. 76–90.
- [2] Ermakov A., Kalinichev V., Nisan A., Potapov G., Frolova Ye. Opyt 3D-pechati elementov volnovodnykh SVCh - traktov i rupornykh antenn diapazona 8,5–31 GGts [Experience in 3D printing of elements of the wave-guide MWF lines and horn antennas in the 8.5–32 GHz range]. *Vektor vysokikh tekhnologiy*, 2019, no. 1 (41), pp. 8–19.
- [3] Borshchev Yu. P., Sysoev V. K. Integrirovannaya metodika proektirovaniya elementov antenno-fidernykh sistem kosmicheskikh apparatov i tekhnologicheskikh protsessov ikh izgotovleniya s primeneniem selektivnogo lazernogo splavleniya [Integrated technique for designing spacecraft antenna-feeder systems elements and technological processes for their manufacturing employing selective laser alloyage]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 35–44.
- [4] Borshchev Yu.P., Ananyev A.I., Kamyshanov I.V., Telelyayev E.N. Primeneniye metoda 3D-pechati pri izgotovlenii elementov antenno-fidernykh ustroystv kosmicheskikh apparatov [Application of 3D printing method in manufacture of elements of spacecraft antenna-feeder systems]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, iss. 9 (105). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-9-2014>
- [5] Bushminskiy I.P. *Izgotovleniya elementov konstruktсии SVCh. Volnovody i volnovodnye ustroystva* [Manufacture of the MWF structure elements.

- Waveguides and waveguide systems]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1974, 304 p.
- [6] SLM280 2.0. Available at: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-280/> (accessed May 18, 2023).
- [7] Kyarimov R.R., Shaposhnikov N.N., Mitryanin A.V. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie primeneniya additivnoy tekhnologii selektivnogo lazernogo splavljeniya na primere elementov kosmicheskoy tekhniki iz titana [Feasibility study for use of selective laser melting-based additive manufacturing technology as exemplified by titanium space hardware components]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2022, no. 4 (39), pp. 4–20.
- [8] Knyazev S.A., Pyzhov S.I. Analiz tekhniko-ekonomicheskoy tselesoobraznosti vnedreniya additivnykh tekhnologiy v vertoletostroenii [Analysis of technical and economic feasibility of introducing additive technologies in helicopter construction]. *Molodoy ucheniy — Young Scientist*, 2019, no. 49, pp. 175–184. Available at: <https://moluch.ru/archive/287/64950/>
- [9] Borshchev Yu. P., et al. *Rupornaya antenna s ellipticheskimi polarizatorami* [Horn antenna with elliptic polarizer]. Patent RF no. 2778279. Application: 2021128844 dated October 4, 2021. Publ.: August 17, 2022. Bull. no. 23.
- [10] Borshchev Yu.P., et al. *Konicheskaya spiralnaya antenna i sposob ee izgotovleniya* [Cone spiral antenna and its manufacture technique]. Patent RF no. RU 2 730 114 C2. Application: 2020100068 dated January 10, 2020. Pub.: August 17, 2020. Bull. no. 23.
- [11] Perviy opyt pechati metallom volnovodnogo filtra Ka-diapazona na 3D printere [First experience in metal printing of the Ka-band waveguide filter on the 3D printer]. *Blog kompanii Spetsialnyi Tekhnologicheskii Tsentr — Special Technological Center blog*. Available at: https://habr.com/ru/companies/stc_spb/articles/659691/ (accessed May 18, 2023).
- [12] Smirnov A.S., Galinovskiy A.L., Martysyuk D.A. Snizhenie sherokhovatosti poverkhnostey additivnykh izdeliy elektrokhimicheskimi metodami obrabotki [Reducing additive product surface roughness by electrochemical processing methods]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 7, pp. 16–23. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-7-16-23>

Borshchev Yu.P., Postgraduate, Section Chief, Department no. 323, Lavochkin Association. e-mail: BorshchevIUP@laspace.ru

Sysoev V.K., Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Scientific Research and Advanced Studies, Lavochkin Association. e-mail: Sysoev@laspace.ru